

# Méthodologie de diagnostic pluridisciplinaire des digues fluviales

Paul Royet<sup>a</sup> et Michel Lino<sup>b</sup>

Les digues de protection contre les inondations représentent un très important linéaire en France, estimé à environ 7 500 km (Mériaux *et al.*, 2004). Il s'agit le plus souvent d'ouvrages anciens, construits par étapes avec les matériaux et les moyens disponibles à l'époque. Ainsi, certaines levées<sup>1</sup> de la Loire remontent à l'époque de Charlemagne (Dion) ; ces « turcies », constituées de fascines en bois et de terre avaient pour vocation de favoriser l'inondation sans courant de terres cultivées. Ailleurs, ce sont des endiguements de stabilisation du lit mineur qui ont été construits pour la navigation. Ces ouvrages ancestraux se retrouvent souvent au sein des digues de protection contre les inondations, elles-mêmes rehaussées au fil des siècles (figure 1), suite à des événements ayant conduit à leur surverse et donc à des brèches.

Les principaux traits caractéristiques des digues sont donc :

- leur histoire, souvent ancienne et parfois agitée, ce qui conduit à rechercher ces informations historiques ;
- leur grand linéaire, ce qui conduit à rechercher des méthodes de reconnaissance à grand rendement, au moins dans les premières étapes du diagnostic ;
- les nombreux points singuliers (déversoirs, traversées, conduites, constructions internes) qui sont autant de points potentiels de faiblesse et qu'il faudra identifier de façon exhaustive.

Après une présentation rapide des modes de défaillance des digues, nous proposons une méthodologie de diagnostic pluridisciplinaire et par étapes, adaptée aux spécificités de ces ouvrages.

## Mécanismes de dégradation et de rupture et orientations pour le diagnostic

### Les données issues du retour d'expérience

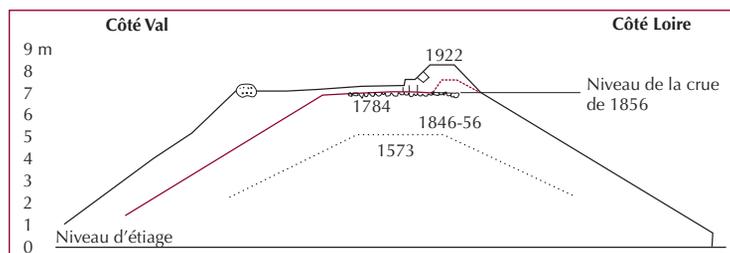
L'analyse des brèches survenues sur des systèmes endigués montre que les trois principaux mécanismes de rupture que l'on observe sont les suivants :

- rupture par surverse du fleuve vers le val<sup>2</sup> ;
- rupture par renard hydraulique ;
- rupture par affouillement du pied de digue côté fleuve.

1. Terme synonyme de « digues ».
2. Terme utilisé pour désigner le territoire protégé par la digue.

### Les contacts

a. Cemagref UR  
Ouvrages hydrauliques  
et hydrologie,  
3275, route de Cézanne  
CS 40061, 13182  
Aix-en-Provence  
Cedex 5  
b. ISL ingénieurs  
conseils,  
75, boulevard Mac  
Donald, 75019 Paris



▲ Figure 1 – Coupe type d'une digue de Loire (extraite de Dion).

De façon moins courante, on a également pu observer des ruptures par surverse du val vers le fleuve ; c'est le cas lorsque le val est inondé et que l'eau s'accumule dans sa partie aval sans trouver de retour vers le fleuve lors de la décrue.

Certaines digues de la Loire ont été équipées de « banquettes », petits merlons de terre ou de maçonnerie surélevant la crête côté fleuve, et ayant pour objet de protéger des vagues. Ces dispositifs sont en général très vulnérables dès qu'ils sont soumis à une charge hydraulique durable.

Enfin, des ruptures par instabilité d'ensemble de la digue se sont produites dans quelques cas – ce mécanisme étant le plus souvent associé à un autre, tel que l'érosion interne (dans le cas d'une rupture du talus côté val) ou l'affouillement (dans le cas d'une rupture du talus côté fleuve).

Il est intéressant de noter que, pour un système d'endiguement donné, la répartition entre les différents mécanismes de rupture peut évoluer au fil du temps et, bien sûr, différer selon les événements hydrologiques. Ainsi, lors des trois grandes crues de la Loire au XIX<sup>e</sup> siècle, la surverse du fleuve vers le val a été à l'origine de près de la moitié des brèches alors que, dans la situation actuelle, vu l'évolution du profil en long du lit mineur, le principal risque est l'affouillement du pied de levée. Autre illustration en Camargue où le mécanisme de renard a été à l'origine de la totalité des brèches en 1993 et 1994. Le programme d'entretien et de confortement entrepris depuis lors a permis d'éviter de nouvelles ruptures par renard lors de la crue de décembre 2003 qui, compte tenu du niveau atteint, a provoqué des brèches par surverse.

### Les grandes orientations pour le diagnostic

Le retour d'expérience sur les mécanismes à l'origine des brèches fournit les orientations majeures des études de diagnostic :

- l'intérêt de la recherche préalable d'archives ;
- l'apport de la topographie précise ;
- l'importance de l'inspection visuelle ;
- la nécessité de prendre en compte les aspects hydrauliques et morphodynamiques ;
- l'intérêt de croiser différentes méthodes de reconnaissance géophysiques et géotechniques.

Il apparaît donc clairement que la composante géotechnique ne constituera pas l'essentiel du contenu d'une démarche de diagnostic d'un système endigué, contrairement à ce que l'on a pu constater pour un certain nombre d'études réalisées dans les années 1990.

## Proposition de méthode de diagnostic

### L'approche historique

L'analyse des documents anciens et récents (archives, plans, photos, études) a pour objectifs de :

- localiser les brèches historiques (point essentiel) ;
- connaître les phases de construction et de renforcement de la levée ;
- recenser et localiser les repères de crues historiques ;
- disposer d'une synthèse sur les extractions de matériaux dans la zone ;
- identifier et localiser des ouvrages singuliers dans la digue.

### L'approche morphodynamique

De manière générale, le diagnostic doit permettre d'identifier les évolutions passées et à venir du chenal fluvial : glissement des méandres, progression latérale des îlots, enfoncement du lit, points durs et ruptures de pente.

L'échelle spatiale pertinente d'analyse est ici le secteur fluvial de plusieurs kilomètres encadrant la levée étudiée, incluant le lit endigué et les vals de part et d'autre des levées. La connaissance des anciens bras ou chenaux d'expansion des crues renseigne sur les secteurs les plus sollicités.

L'analyse théorique de la morphodynamique de la rivière repose sur les connaissances de l'hydrologie, de la sédimentologie et des caractéristiques morphométriques du fleuve. Un découpage en zones homogènes est réalisé à partir de la connaissance des pentes longitudinales, du tracé, des actions anthropiques (en particulier, les extractions de matériaux dans les lits). Les singularités géologiques seront éventuellement recherchées.

L'étude comparative des profils en long et en travers du cours d'eau est réalisée à différentes échelles de temps sur les documents existants. Les

modifications du tracé sont évaluées en terme de coefficient de sinuosité des méandres et de rayon de courbure et en terme de densité de réseau hydrographique. On note l'évolution dans le temps de l'importance et de la végétalisation des îles.

L'analyse hydraulique et les profils types du cours d'eau permettent d'estimer des vitesses de courant par zone et les forces tractrices sur le fond et les berges (pour le débit de plein bord du lit mineur).

L'analyse de terrain permet d'affiner et de nuancer les résultats de l'analyse théorique. Cette visite permet d'appréhender la composante sédimentologique et renseigne sur les processus d'évolution. On définit les types de désordres (érosion par le courant, glissement, effondrement) et de dépôts (convexités, élargissements, pertes de charges, embâcles). On repère les profils apparemment stables ou instables et on analyse les évolutions possibles : avancée de train de méandres (érosion vive à l'extrados, banc de convexité en cours de végétalisation), enfoncement du lit (ripisylve perchée, traces évidentes aux ouvrages, ruptures de pente). L'évolution longitudinale de la granulométrie est en rapport avec les pentes et tracés ; il est intéressant de faire quelques prélèvements de matériaux pour analyse afin de préciser la dynamique, en mettant particulièrement en évidence le phénomène de tri granulométrique.

Des essais pénétrométriques peuvent permettre d'estimer la profondeur de zone remaniée en pied de digue côté fleuve, dont la connaissance est nécessaire à la définition du projet de confortement du pied de levée. On compare, alors, l'épaisseur de la zone de moindre compacité avec les estimations basées sur les formules semi-empiriques de remobilisation du lit.

Enfin, l'aptitude locale à l'affouillement peut être précisée par un *suivi bathymétrique* régulier.

### La topographie

L'objectif des reconnaissances topographiques à exécuter est triple :

- établir le lien avec les lignes d'eau en crue ;
- préciser les profils en travers pour les études géotechniques ;
- fournir un instrument de report pour l'inspection visuelle et le suivi des digues.

Dans cette optique, le travail minimum que nous préconisons consiste à réaliser :

- au moins un profil en long au pas de 20 à 25 m de la crête de digue, sur la plate-forme du couronnement (bien lever en plus les points bas singuliers) – doublé d'un second profil au sommet de la banquette si elle existe ;
- des profils en travers espacés de 50 à 200 m suivant l'homogénéité de la zone, chaque profil comportant au moins 12 points levés et débordant largement les pieds de la digue.

Cependant, nous recommandons vivement l'établissement d'un plan topographique au 1/500<sup>e</sup> ou 1/1 000<sup>e</sup> s'avérant particulièrement utile pour le suivi et la maintenance des levées. Le plan constitue alors le support des observations visuelles, qui est l'outil le plus efficace de suivi des ouvrages. Le coût d'un tel lever est de l'ordre de 2 000 à 3 000 € HT par kilomètre, dès lors que la commande porte sur des tronçons de plusieurs kilomètres.

### L'étude hydrologique et hydraulique

L'objectif général est de pouvoir évaluer le niveau de protection théorique des digues, en l'absence de ruptures, c'est-à-dire l'occurrence de l'événement conduisant à la surverse. Cela se fait en comparant les lignes d'eau en crue et le profil en long de la crête de digue.

La première étape est l'étude hydrologique du cours d'eau, qui permet d'associer une période de retour aux débits de crue. La deuxième étape est l'étude hydraulique qui permet de connaître les lignes d'eau pour différents débits. Pour la méthodologie de ces études, on se reportera aux guides spécifiques traitant de ces questions, par exemple :

- guide méthodologique PPR inondations édité par le MEDD (MEDD, 1999) ;
- le ralentissement dynamique pour la prévention des inondations (MEDD, 2004).

Les aspects hydrauliques particuliers, liés à la morphologie locale du lit (variation rapide de la section hydraulique, courbure du lit, orientation biaise de la levée par rapport à la direction du courant...) demandent, dans certains cas, à être abordés par une étude spécifique. Il est alors envisageable de réaliser un modèle hydraulique local sur le tronçon de rivière encadrant le tronçon de levée à diagnostiquer. Le modèle général four-

nira les conditions aux limites du modèle local à réaliser. Suivant la nature du problème posé, le modèle local pourra être un simple modèle filaire en régime permanent dans le but de préciser la forme de la ligne d'eau au voisinage de la levée. Dans les cas plus complexes, un modèle bidimensionnel type Barré de Saint-Venant pourra être indispensable pour analyser les conditions hydrauliques à proximité des digues : surélévation locale de la ligne d'eau, orientation du courant, vitesse de courant.

### L'inspection visuelle

L'inspection visuelle s'avère incontournable pour établir un état initial de la levée puis en permettre le suivi ultérieur. Le principe général de la méthode consiste à parcourir intégralement à pied le linéaire de la digue à diagnostiquer, en répertoriant toutes les informations visuelles, d'une part sur les caractéristiques morphologiques externes de l'ouvrage et, d'autre part, sur les désordres ou les présomptions de désordre affectant l'une ou l'autre de ses composantes.

Pour les levées bordées directement par le fleuve, la reconnaissance pourra être complétée côté fleuve par :

- une inspection par barque (cas d'un pied de talus subvertical, inaccessible et/ou boisé) ;
- une visite subaquatique (cas d'un perré ou d'une protection de pied se prolongeant sous le niveau d'étiage).

L'inspection est réalisée par une équipe de deux ou trois techniciens ayant une compétence en géotechnique. Le garde digue ou le surveillant de travaux, en charge du secteur de digues concerné, fait partie de l'équipe, à la fois pour la guider, mais aussi pour capitaliser la connaissance acquise à l'occasion de l'inspection.

Dans la méthodologie standard de diagnostic à sec que nous proposons, nous recommandons avec insistance que le levé topographique détaillé soit réalisé *avant* l'inspection, dans la mesure où le plan au 1/500° constitue un précieux, pour ne pas dire indispensable, outil de repérage et de report des informations visuelles.

L'inspection proprement dite doit se dérouler après un dégagement soigné de la végétation herbacée et arbustive et, si possible, hors période de végétation (automne et hiver) afin de bénéficier de conditions de visibilité optimales.

Les points à observer et informations à répertorier portent sur :

- les caractéristiques morphologiques, en particulier les singularités non répertoriées sur les plans ou profils ;
- les indices de désordres avec leur position (végétation, terriers, ravinements, zones humides, tassements) ;
- l'état des protections de talus et de pied ;
- la nature et l'état de la banquette ;
- les ouvrages singuliers (traversées batardables, conduites, constructions dans le corps de la digue).

Les opérateurs de l'inspection utilisent des fiches standard de relevé des désordres, telles que celles figurant dans Lino *et al.* (2000). L'idée est que le même modèle de fiche soit utilisé en reconnaissance initiale puis en inspection de routine.

Les désordres inventoriés sont repérés et numérotés, partie par partie d'ouvrage, directement sur un tirage du plan topographique au 1/500°, en respectant une légende normalisée. Les numéros renvoient à des lignes successives des fiches de relevé des désordres où sont portées les annotations de détail et où l'on code les principales informations. Les profils en travers éventuels sont dessinés au verso des fiches et sont repérés suivant le PK de référence qui a été retenu.

Il est, en outre, établi un dossier photographique complet, parfaitement légendé, avec photos d'ensemble et photos de détail des désordres.

Le coût moyen de l'inspection visuelle dans les conditions courantes (sans visite subaquatique, notamment) est de l'ordre de 2 500 € HT par kilomètre, mise au propre et saisie informatique comprises, soit un rendement de 300 à 500 ml/jour pour un binôme d'intervenants.

### Les reconnaissances géotechniques

Un programme pertinent de reconnaissances géotechniques et géophysiques ne peut être défini – et *a fortiori* réalisé – qu'après avoir franchi trois premières étapes de l'étude de diagnostic : *approche historique* (et géologique), *levé topographique* et *inspection visuelle*. L'exploitation rationnelle des résultats de ces trois étapes va alors permettre :

- de choisir les moyens de reconnaissance géotechnique *a priori* les plus adaptés au contexte (Lino *et al.*, 2000)<sup>3</sup> ;

3. Contient un ensemble de fiches, décrivant, pour chaque méthode de reconnaissance, son principe, ses conditions de mise en œuvre, son domaine d'application (en particulier dans le cas de digues à sec), et son coût.

– de guider l’implantation physique des dites reconnaissances.

#### a) Reconnaissances géophysiques en continu

*A priori*, deux objectifs peuvent être assignés à la reconnaissance en continu :

– sous contrôle d’un étalonnage préalable du (ou des) dispositif(s) utilisé(s) et d’une analyse croisée, *a priori* ou *a posteriori*, avec les résultats des sondages systématiques, fournir une vision spatiale de la constitution de la digue et apprécier son degré d’hétérogénéité ;

– mettre en évidence des points ou des tronçons singuliers, nécessitant des reconnaissances approfondies.

Parmi la panoplie d’outils géophysiques disponibles, le choix n’est pas forcément évident. Ce fut d’ailleurs l’objet d’une des actions du projet national Criterre, portant sur l’intercomparaison de méthodes de reconnaissance à grand rendement dans le cas des digues à sec. Les résultats en sont présentés dans une autre communication à ce même colloque (Fauchard, Mériaux, 2004).

Pour guider le choix de la méthode géophysique, nous recommandons d’appliquer les deux principes suivants :

- mettre en œuvre en parallèle, dans le sens longitudinal de la digue, deux méthodes au principe complémentaire et/ou ne mesurant pas le même paramètre ;
- privilégier les méthodes qui, en un seul passage (profil en long), ont une profondeur d’investigation *a priori* suffisante pour recouper la fondation de la digue.

Sur de telles bases, la prospection géophysique en continu exige un budget total de l’ordre de 2 500 € HT du kilomètre.

#### b) Reconnaissances ponctuelles à caractère systématique

Ces reconnaissances à caractère systématique – en ce sens qu’elles sont répétées le long de la levée à diagnostiquer – ont pour objet de caractériser la constitution et les propriétés importantes de la digue. En outre, les informations recueillies contribuent à l’indispensable calage des méthodes géophysiques mises en œuvre précédemment en continu. Les reconnaissances ponctuelles

comprennent, essentiellement, des sondages et des essais géotechniques.

L’établissement du programme de sondages et d’essais résulte d’un compromis entre la performance des dispositifs envisagés, la teneur des informations recherchées (dans notre contexte, pour l’essentiel : défauts ou contrastes de perméabilité – *essentiels dans le comportement des digues* – et/ou défauts de compacité, contacts entre différentes parties d’ouvrage) et les coûts de mise en œuvre ramenés au linéaire de digue.

Le choix des modalités d’espacement entre sondages est aussi le résultat d’un compromis. Aussi, les espacements de sondages que nous suggérons ci-après (200 m et 2 km) doivent-ils être interprétés comme des moyennes, et non de façon absolue. En particulier, si une campagne géophysique en continu a eu lieu et a permis d’établir un zonage *a priori* pertinent des variations de constitution de la digue et/ou de sa fondation, il est recommandé de s’appuyer sur ce zonage pour répartir les sondages (avec un pas éventuellement variable).

Le programme-type de sondages systématiques que nous recommandons est le suivant :

- tous les 200 m : en crête de digue, sondage pénétrométrique (statique, dynamique classique ou dynamique léger), jusqu’à atteindre la fondation ; coût 400 € HT par sondage ;
- tous les 2 km :
  - *en crête de digue, côté val* : un sondage carotté poursuivi en fondation (12 à 15 m dans le cas de la Loire) et équipé d’un piézomètre (coût : 2 200 € HT/sondage), avec, dans la digue et en fondation :
    - prélèvements d’échantillons intacts (et essais labo : indentation et mécaniques) ou essais au phicomètre (coût : 1 000 € HT) ;
    - essais de perméabilité Lefranc (coût : 450 € HT) ;
  - *en bas de talus, côté val* : un sondage destructif avec enregistrement des paramètres, poursuivi en fondation (5 à 10 m) et équipé d’un piézomètre (coût : 750 € HT/sondage). En variante, on peut également avoir recours à des sondages à la tarière ;
  - *en section transversale* : un profil géophysique, se prolongeant au-delà des pieds de talus (coût : 450 € HT).

Le prix de revient global des reconnaissances systématiques ainsi définies est de l'ordre de 4 500 € HT du kilomètre dans le contexte d'une digue de 4 à 5 m de hauteur avec une fondation rocheuse à une dizaine de mètres de profondeur.

En variante à cette solution de base, et lorsqu'on s'intéresse essentiellement, voire exclusivement (cas d'une levée ayant déjà fait l'objet de sondages ou essais mécaniques et/ou apparaissant comme largement dimensionnée au plan mécanique) aux contrastes de perméabilité, les reconnaissances systématiques pourront être basées sur l'utilisation du Perméafor (Ursat, 1992). Vu la facilité d'accès, les rendements escomptés devraient être de l'ordre de 50 m/jour, soit 4 forages de 12,5 m. À raison d'un essai tous les 200 m, on aboutit à un coût d'environ 3 000 €/km – montant inférieur à celui de la solution de base, mais pour un recueil d'informations plus restreint. Une campagne d'essais Lefranc reste nécessaire pour caler le Perméafor et d'obtenir les valeurs de perméabilité vraie.

#### *c) Reconnaissances approfondies sur points ou tronçons singuliers*

Elles sont à réaliser aux points ou tronçons de levée où les investigations en continu ou à caractère systématique, ou encore l'inspection visuelle, ont mis en évidence des anomalies ou des singularités, susceptibles de révéler l'existence d'une zone de faiblesse dans la digue.

Par essence, il est impossible d'établir un programme-type pour ces reconnaissances qui devront s'adapter, au cas par cas, à la situation rencontrée. Tout au plus pouvons-nous fournir quelques pistes :

- une prospection radar approfondie permettra de repérer le contour ou le tracé de singularités à interface très tranchée comme celle d'un ouvrage dur enfoui dans le sol (ex. : ancienne canalisation, maçonnerie) ou d'un gros vide, à condition que le matériau de surface ne soit pas trop conducteur ;
- les méthodes électriques, du type panneau électrique, seront plus adaptées pour la cartographie de zones singulières de sol à faible résistivité (ex. : poche d'argile, horizon humide).

La rémunération de telles prestations particulières ne peut se faire que sur bordereau des prix unitaires, avec quantités indicatives portées dans

un détail estimatif : ceci nécessite de prévoir au marché un bordereau de prix couvrant une large gamme de prestations.

Si on exclut les reconnaissances particulières sur tronçons singuliers, le coût récapitulatif de la méthode de prospection géophysique et géotechnique préconisée s'établit aux environs de 6 000 à 7 500 € HT du kilomètre. Dans le budget global, ce poste demeure donc d'un poids important : ce qui confirme l'intérêt qu'il y a à préparer de façon minutieuse et réfléchie le programme d'intervention.

### **La modélisation**

La modélisation numérique est désormais une approche très courante en géotechnique. L'accroissement de la puissance de calcul des micro-ordinateurs et le développement de logiciels spécialisés de plus en plus conviviaux permettent de tester rapidement une gamme de cas de charge sur un ouvrage, sous un large faisceau d'hypothèses. L'intérêt évident de ces outils ne doit cependant pas faire oublier deux limitations importantes :

- tout modèle est une simplification intellectuelle de la réalité qui repose sur la représentation plus ou moins complète de quelques phénomènes physiques et de leurs interactions (parmi lesquelles les conditions aux limites) ;
- la qualité du résultat d'une modélisation est d'autre part directement dépendante de la qualité et de la représentativité des données servant à fixer les paramètres du modèle.

Sur le premier point, on peut *a priori* considérer que, s'agissant d'ouvrages relativement simples, l'analyse des digues ne nécessite pas des modèles très sophistiqués et de nombreux outils largement répandus dans l'ingénierie peuvent être considérés comme adaptés. Par contre, la modélisation trouve essentiellement ses limites sur le second point : les levées sont hétérogènes et certains paramètres des modèles sont difficiles à obtenir de façon représentative et fiable (en particulier les caractéristiques mécaniques).

La modélisation des levées nous semble donc devoir être menée dans l'esprit suivant :

- privilégier des modèles relativement simples dont les paramètres et les conditions aux limites puissent être assez faciles à caler ;

- pour le diagnostic des levées, vérifier systématiquement la sensibilité des résultats en faisant varier les données dans des plages issues des résultats des reconnaissances ou issues d'autres études ;
- utiliser les modèles pour comparer entre elles diverses solutions de confortement et/ou optimiser leur dimensionnement.

La modélisation hydraulique, réalisée en régime permanent avec une étude paramétrique sur les valeurs de perméabilité, a pour but de déterminer la piézométrie interne à prendre en compte dans la modélisation mécanique et les gradients hydrauliques pour évaluer les risques de renard. Le renard apparaît comme une cause principale de rupture des digues. Les méthodes actuelles de diagnostic de cet aléa sont dans l'ensemble peu satisfaisantes. L'approche traditionnelle par la formule de Lane est erronée : la règle de Lane a en effet été établie pour le risque de renard au contact d'une fondation rigide ; elle donne une estimation pessimiste pour une digue. L'approche par le calcul des gradients de sortie et la comparaison avec un gradient critique est plus satisfaisante, mais elle trouve sa limite dans l'hétérogénéité des digues qui conditionnent les valeurs locales des gradients d'écoulement. Les coefficients de sécurité à adopter ne font pas l'objet d'un consensus (Fry, 2004).

La *modélisation géomécanique* sera menée avec des modèles simples basés sur la méthode d'équilibre limite avec surface de rupture circulaire. Une approche paramétrique sera privilégiée, sachant qu'un des intérêts majeurs de la modélisation mécanique est d'évaluer l'amélioration apportée par un confortement et de comparer entre elles différentes solutions.

### La hiérarchisation cartographique des risques

Il convient généralement d'intégrer à l'étude de diagnostic de la levée une évaluation sommaire des risques liés à sa rupture ou à son dysfonctionnement.

En effet, les conséquences de la rupture d'une levée ou d'un tronçon de levée doivent être sommairement appréciées, de façon à hiérarchiser les tronçons d'étude et à adapter, le cas échéant, les moyens de diagnostic ou de confortement mis en œuvre à la vulnérabilité du val protégé.

Les *aléas* de rupture seront appréciés en se fondant sur les conclusions de l'expertise, qui visera à affecter à chaque tronçon de digue une classe d'aléa de rupture, suivant la classification suivante :

0. digue parfaitement sûre ;
1. digue moyennement sûre ;
2. digue à risque modéré ;
3. digue à haut risque.

L'aléa global d'un tronçon résulte de l'aléa le plus élevé parmi les aléas partiels liés aux différents mécanismes de rupture ou de dégradation (surverse, érosion côté Loire, érosion interne, fontis...).

La *vulnérabilité* sera appréciée, à partir des critères suivants :

- occupation des sols (zone urbaine, périurbaine, industrielle, agricole...) ;
- importance de la population protégée ;
- voies de communication menacées (routes, voies ferrées, canaux...) ;

et sera caractérisée par une classe de vulnérabilité :

1. vulnérabilité faible ;
2. vulnérabilité moyenne ;
3. vulnérabilité forte ;
4. vulnérabilité très forte.

L'évaluation du *risque* associé à un tronçon est le croisement de *l'aléa de rupture* du tronçon et de la *vulnérabilité* du val protégé. Il est caractérisé par une note qui est le produit des notes d'aléas et de vulnérabilité. Ce nombre, compris entre 0 (aucun risque) et 12 (risque fort), permet de comparer en termes de risque des situations diverses. Ainsi le même risque, caractérisé par la note 6, sera associé à une levée présentant un haut aléa de rupture et protégeant un val à vulnérabilité moyenne et une levée à aléa modéré protégeant un val à vulnérabilité forte.

Une approche cartographique, à une échelle adaptée (1/10 000<sup>e</sup>), est recommandée pour la synthèse de l'étude de risque. Elle fera ressortir :

- le découpage en tronçons homogènes ;
- la caractérisation par tronçon de l'aléa de dysfonctionnement et de rupture ;
- la vulnérabilité par zone des vals protégés ;
- la classe de risque associée à chaque tronçon.

### Avant projet de confortement

L'objectif général à mentionner pour ce volet d'étude est d'aboutir à la conception, au minimum au stade avant-projet, de l'ensemble des ouvrages nécessaires à la mise en sécurité de la digue face à la situation de crue d'occurrence centennale (niveau de sécurité habituellement pris en compte pour les ouvrages défendant des zones urbanisées). Le fait d'exiger une conception des confortements jusqu'au niveau « avant-projet » (AVP) permet *a priori* d'assurer que l'étude de diagnostic conduira à des conclusions opérationnelles, immédiatement exploitables par le service gestionnaire en vue de la programmation des travaux.

Le tableau 1 présente un certain nombre d'options de confortement vis-à-vis de tel mécanisme de rupture reconnu comme probable à l'issue des précédentes étapes du diagnostic. Dans ce cadre, tout ou partie des aspects suivants doit être abordé dans l'étude :

- dimensionnement des confortements (le cas échéant avec plusieurs solutions) ;
- étude des matériaux d'emprunt (provenance, quantité, qualité) ;

- traitement des points singuliers (galeries, conduites, constructions, déversoirs...) ;
- contraintes de réalisation des travaux (calendrier, travaux provisoires, sécurité) ;
- cohérence d'ensemble du projet de confortement (à l'échelle d'un secteur endigué) ;
- prise en compte des contraintes environnementales.

### Conclusion

L'étude méthodologique, conduite à l'origine pour le compte de l'Équipe pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature, s'est essentiellement appuyée sur l'analyse d'études existantes et une bonne connaissance de la problématique des digues fluviales. Cette méthodologie de diagnostic, déclinée dans un cahier des charges-type d'étude, a été validée dans différents contextes d'endiguements.

Le coût de diagnostic auquel on aboutit se situe dans la fourchette de 15 à 30 k€/km dans sa version complète. Ce chiffre est élevé en absolu mais supporte bien la comparaison avec le coût des travaux de confortement, dont l'ordre de

▼ Tableau 1 – Exemples d'options de confortement selon des mécanismes de rupture reconnus comme probables.

Mécanisme de rupture	Options de confortement	Commentaires : objectifs du confortement, domaine/contraintes d'application
Surverse	Suppression des points bas ou rehaussement de la digue. Déversoir amont.	<i>Adaptation de la cote d'arase de la levée en veillant à l'étanchéité de la rehausse.</i> <i>Limitation de la cote de crue au droit de la levée.</i>
Érosion de talus et affouillement	Protection du pied de levée côté fleuve. Protection/revêtement du parement du talus.	<i>Zones en contact direct avec le fleuve (risque de remise en mouvement du fond d'alluvions), en complément, ou non, d'une protection de pied.</i>
Renard hydraulique	Recharge drainante côté Val. Masque étanche côté fleuve ou écran étanche (paroi moulée, écran mince au coulis, rideau de palplanches) dans le corps de la levée. Lutte contre les fouisseurs. Traitement des points singuliers.	<i>Lorsque l'emprise disponible le permet, nécessité de respecter les règles de filtre au contact recharge/talus de la digue.</i> <i>Limitation des débits de fuite et/ou augmentation de la longueur des lignes de fuite.</i> <i>Capture des animaux, protections grillagées, etc.</i> <i>Lorsque ceux-ci sont à l'origine du risque de renard : traversées de conduite, constructions, caves.</i>
Instabilité d'ensemble	Recharge du talus côté Val et/ou côté fleuve. Masque étanche côté fleuve ou paroi moulée dans corps.	<i>Selon le talus concerné (en général, du fait d'une pente trop forte).</i> <i>Pour stabiliser le talus côté val en rabattant la ligne de saturation dans la digue.</i>

grandeur avoisine assez souvent 1 M€/km (soit un ratio de 1,5 à 3 % pour le diagnostic jusqu'au stade avant-projet).

Sur plusieurs points, des approfondissements et des développements sont en cours, et font l'objet d'autres articles ou communications :

– moyens de prospection géophysique à haut rendement, avec l'objectif de détecter les hétérogénéités ou singularités dans les levées (Fauchard et Mériaux) ;

– résistance des ouvrages en remblai (digue, banquettes, cordon fusible en terre) à la surverse (Royet et Mériaux) ;

– diagnostic et prévention du risque d'érosion interne, objet d'un prochain projet national de recherches (Fry, 2004) ;

– gestion cartographique, à différentes échelles d'analyse, des informations concernant les digues (système d'information à références spatiales) (Maurel *et al.*, 2004). □

### Résumé

Cette communication présente une méthodologie de diagnostic des digues qui a, dans un premier temps, été développée dans le contexte de la Loire moyenne. Cependant cette approche, résolument pluridisciplinaire, s'applique à la plupart des systèmes d'endigements de protection contre les crues, dont les principales caractéristiques sont d'être des ouvrages de faible hauteur, à grand linéaire, souvent anciens et qui ne sont que très rarement soumis aux sollicitations auxquelles ils sont sensés résister. On aborde les étapes successives du diagnostic : volet historique, morphodynamique, hydrologie et hydraulique, inspection visuelle, reconnaissances géophysiques et géotechniques, modélisation, analyse des risques.

### Abstract

The methodology for dykes' diagnosis, presented in this paper, has been first developed in the context of Loire River. Nevertheless this pluridisciplinary approach may be applied to all kinds of dykes for flood protection whose main characteristics are their small height, great length, old age and rare operation. The successive steps of the diagnosis are described: history, morphodynamics, hydrology and hydraulics, visual inspection, geophysical and geotechnical investigations, modelling, risk analysis.

## Bibliographie

- DION, R., *Histoire des levées de la Loire*.
- FAUCHARD, C., MÉRIAUX, P., 2005, Les méthodes de reconnaissance à grand rendement adaptées aux digues de protection contre les inondations, *Ingénieries EAT, n° spécial Sécurité des digues fluviales et de navigation*, p. 81-89.
- FRY, J.-J., 2004, Présentation du projet national Irex sur l'érosion interne, colloque CFGB 2004.
- MÉRIAUX, P., TOURMENT, R., WOLFF, M., 2004, Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France métropolitaine, colloque CFGB 2004.
- LINO, M., MÉRIAUX, P., ROYET, P., 2000, *Méthodologie de diagnostic des digues, appliquée aux levées de la Loire moyenne*, Cemagref éditions, 224 p.
- MAUREL, P., TOURMENT, R., ROMAC, A.-P., COGNET, J., 2004, Le SIRS Dignes, un système d'information pour les gestionnaires locaux de digue : cas du Symadrem et de l'AD Isère-Drac-Romanche, colloque CFGB 2004.
- MEDD, 1999, *Guide méthodologique plans de prévention des risques d'inondations*, Ed. La Documentation française, 124 p.
- MEDD, 2004, Le ralentissement dynamique pour la prévention des inondations, MEDD, Cemagref, téléchargeable en ligne à [http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE\\_RD\\_Web.pdf](http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE_RD_Web.pdf)
- URSAT, P., 1992, Le Perméafor, appareillage de diagraphie de perméabilité, *Bulletin des Ponts et Chaussées*, n° 178, p. 19-26.
- ROYET, P., MÉRIAUX, P., 2005, Les déversoirs fusibles le sont-ils vraiment ? *Ingénieries EAT, n° spécial Sécurité des digues fluviales et de navigation*, p. 55-63.